水冷式耐火構造のアルミニウム合金構造への適用に関する研究

－沸騰水冷式の耐火性能付与能力の検証－

主査　新谷　眞人*1
委員　下田　亮太*2

アルミニウム合金構造へ沸騰水冷式を適用するため，床材，壁材の加熱実験を行った。床材，壁材は加熱によって沸騰する水蒸気の増加に伴い，水内部の圧力が増加するが，蒸気減圧弁を設置して水内部の気圧を減少させた。その条件下の熱流束から低減率を算出し，吸熱熱流束推定式を提案した。解析により ISO834 標準加熱温度曲線下で，アルミニウム合金の加熱側表面温度は 200℃以下に保持されることが示され，目標とする耐火性能を付与できることを立証した。また，沸騰水冷式に適した接合部の設計を行い，伝熱特性を把握し，解析によりその耐火性能を示した。これにより，アルミニウム合金構造の建築規模を大きくし用途を広げることができる。

キーワード：1）アルミニウム合金構造，2）水冷式，3）耐火構造，4）沸騰，
5）押出型材，6）加熱実験，7）無耐火被覆，8）壁式構造，9）熱流束

APPLICATION OF WATER-COOLING FIREPROOF STRUCTURE TO ALUMINUM STRUCTURE

— Verification of Fireproof by utilizing Boiling Water-Cooling System —

Ch.　Masato ARAYA
Mem.　Ryota SHIMODA

We conducted aluminum flooring and wall heating experiments in order to apply to the boiling water-cooling system to aluminum alloy construction. The experiment results suggested the endothermic heat flux estimation formula of the flooring and wall with a steam pressure reducing valve. We verified the possibility of imparting fireproof to aluminum alloy by the analysis under the standard heating temperature curve ISO834. We have designed the joint part which has fireproof capacity by studying the heat transfer characteristic in the joint. We can build more large-scale aluminum structure with various applications.

1.　序論

1.1　研究の背景と目的

建築基準法は材料の耐火性能を規定された加熱温度と時間とによって 2 時間耐火，1 時間耐火，30 分耐火等を指定している。通常の火災時の温度は 600℃以上に達する。一方アルミニウム合金（A6063-T5）は内部温度 200℃に達すると強度が約 60%，縦弾性係数が常温時の約 80%以下に低下し，300℃ではクリープ変形が顕著となり，形態を喪失する。このため，アルミニウム合金は加工性，耐候性に優れた建築用材料であり，建築基準法においては構造用材料として一般的に認定されていながら耐火性に劣るため，建築基準法により床面積・階数などの規模に制限が課せられている。本研究では 4 階建ての集合住宅の床および壁を，梯子形断面形状を持つアルミニウム合金パネル（以下アルミパネル）によって構成することを想定し，当面 1 時間耐火性能付与を目的とする。

閉鎖型断面形状を持つアルミパネルを製造し，床あるいは壁に使用する。アルミパネル内部に満たした水が沸騰する際の気化熱によって，加熱によるアルミパネル部材内部の熱を奪い，温度上昇を抑制することによりアルミパネルの強度・剛性低下を抑えて長期荷重状態にある床あるいは壁の安全性を保持する。アルミニウム合金構造システムにおける沸騰水冷時の部材伝熱特性を把握し，加熱される部材表面の温度を推定して，沸騰水冷式による耐火性能付与の可能性を検証する。

1.2　既往研究

今日では，水冷式耐火構造は非常に珍しく，また採用されにくい構造であるが，この考え方は古くから存在し，1970 年，US Steel 株式会社の本社ビル[注1]に水冷式耐火構造が採用された例がある。18 本の箱型断面の外柱には耐火被覆は無く，柱内部に水を循環させることによって耐火性能を付与している。また，水冷式鋼管構造[文1)文2)文3)文4)文5)]としていくつかの研究も行われ，耐火性は充填水がある限り充分であると知見が得られている。

*1　早稲田大学理工学術院　特任教授
*2　早稲田大学大学院創造理工学研究科　修士課程

水冷式のアルミニウム合金への適用については新たな研究テーマであり，自己の研究によって得た知見を以下に述べる。

1）流水水冷式の軸材への適用[文6)]

アルミニウム合金製の軸材に流水水冷式を適用し，部材温度簡易算定式により，軸材の熱的，変形性状を模擬できることを実験により確認している。また実験にておいて流水水冷式の軸材に対する耐火性能付与能力を確認している。

2）流水水冷式の面材への適用[文7)]

アルミニウム合金製の面材に流水水冷式を適用し，部材温度簡易算定式により，軸材の熱的，変形性状を模擬できることを実験により確認している。また実験において，流水水冷式の面材に対する耐火性能付与能力を確認している。

3）沸騰水冷式の適用[文7)]

アルミニウム合金製の面材に対して沸騰水冷式を適用した時の耐火性能付与能力，また使用水量が流水水冷式と比較すると大幅に削減できることを実験により確認している。

本研究ではこれらの知見を踏まえ，水冷式アルミニウム合金耐火構造の実現においては，「沸騰水冷式」がより適していると判断した。

1.3　研究の方法と構成

アルミニウム合金は 1.1 で述べた特徴に加え，独特の質感やリユースの可能性の高さ等の特徴を考えると，アルミニウム建築は線材よりも面材で構成された構造の方がその利点をより活かすことができる。よって，本研究では面で構成されるアルミニウム建築を対象とする。面で構成される建築を設計する場合，床材，壁材，床材と壁材の接合部を設計する必要がある。火災時，沸騰水冷式では吸熱する能力が，材質，内部の水，気泡の流動形式によって異なるため，床材，壁材では吸熱する能力が変化する。また，沸騰水冷式に適した接合部の設計を行い，伝熱特性を把握する必要がある。そのため本研究では，以下の４項目に関して検討を行った。

1）アルミニウム合金材の気泡度の測定

これまで，機械系の分野では液体沸騰時の熱伝達に関して様々な研究が成されており，水平板における液体沸騰時の熱流束の推定式が西川ら[文8)]によって提案されている。西川らによると，沸騰時の熱流束を決定する大きな因子として，起泡度 f_ξ という表面性状に関する因子を挙げている。起泡度 f_ξ とは，気泡が発生する点の数に関する係数であり，理論的に予想することが難しい因子のため，水冷式アルミニウム合金耐火構造として実際に使用する材料の表面性状を想定した上で，測定を行う。

2）床材に沸騰水冷式を適用した場合

床材内部における沸騰時の状態は水と気泡が混ざった状態での沸騰となるため，水平材の上部には水蒸気が溜まる。この水蒸気を部材内部から逃すことで水蒸気による圧力を減圧し，部材内部に一定の水を充填しておくため，蒸気減圧弁を設置した。この蒸気減圧弁を設置した場合において，気泡が熱流束の式にどのような影響があるのか実験，解析により定量的に把握する。

3）壁材に沸騰水冷式を適用した場合

壁材内部における沸騰時の状態は水と気泡が混ざった状態であるという点では床材と同様であるが，部材が壁のように垂直に立ち，内部の水が重力の影響を受ける。このため，沸騰した水が気体となった水蒸気は上昇し，部材下部は液体としての水，上部は気体としての水の比率が多くなる。よって部材上下における気泡量が異なり，熱流束が異なると考えられる。この影響を実験，解析により定量的に把握する。

4）沸騰水冷式における接合部の提案

床ー壁構造における「沸騰水冷式」のシステムの接合部の提案を行い，アルミニウム合金耐火構造の実現可能性を検討する事を目的とする。また，アルミニウム合金同士の接触面の熱伝達特性の把握を実験により行い，数値解析によって接合部の耐火性能の検証を行う。数値解析によって部材温度を推定し，沸騰水冷式の耐火性能付与能力を検討する事を目的とする。

2.　沸騰水冷式耐火構造における熱流束

2.1　沸騰伝熱における熱流束

＜アルミニウム部材外側表面が加熱され上昇する温度＞と＜加熱温度＞によって，部材に流入する熱流束が式（1）によって算定される。

$$q_{in} = h_f\left(T_f - T_{ai_out}\right) + F\sigma\left(\varepsilon_f T_f^{\,4} - \varepsilon_{al} T_{al_out}^{\,4}\right) \quad \cdots (1)$$

ここに，　q_{in}：熱流束［W/m²］

h_f：加熱空気の熱伝達率［W/m²K］

F：形態係数

σ：ステファンボルツマン定数［W・m^{-2}・K^{-4}］

ε_f：加熱空気の放射率

ε_{al}：アルミニウム合金の放射率

T_f：加熱空気温度［℃］

T_{al_out}：アルミニウム合金の加熱面温度［℃］

沸騰水に接する部材が吸熱される熱流束が西川等により提案されている。これを基準熱流束とし算定式を式（2）とする。

$$\text{層流域}：Y = 6.24\left(f_\xi f_p X\right)^{\frac{2}{3}}$$
$$\text{乱流域}：Y = 0.66 l^{-\frac{2}{5}}\left(f_\xi f_p X\right)^{\frac{4}{5}} \quad \cdots（2）$$
$$Y = \frac{\alpha l}{\lambda_L}$$
$$X = \left[\left(\frac{1}{M^2 N}\right)\frac{c_{pL}\rho_L{}^2 g}{\lambda_L \sigma L \rho_V}\right]^{\frac{1}{2}} q l^{\frac{3}{2}}$$
$$N = 1.976\left[\mathrm{W}\right]$$
$$M = 900\left[m^{-1}\right]$$
$$f_p = \left(\frac{P}{P_a}\right)^{0.7}\left[1 + 3\left(\frac{P}{P_c}\right)^3\right]$$

ここに，

f_ξ：起泡度	ρ_L，ρ_V：液体，蒸気の密度
P_a：大気圧	ν_L：液体の動粘性係数
P_c：臨界圧力	q：伝熱面上熱流速
c_{pL}：液体の定圧比熱	l：伝熱面代表寸法
λ_L：液体の熱伝導率	P：圧力
σ：液体の表面張力	g：重力加速度
L：蒸発熱	

この式における部材と水との関係は，部材表面に付着する水が沸騰して気体となり部材表面から常に離脱し，部材表面は常に液体としての水に接している状態にある。

2.2　吸熱熱流束推定式

（2）式をニュートンの熱冷却法則によって，＜冷却側部材表面温度と沸騰水温度の差＞によって表される式（3）に変形する。

層流域：

$$q_{wb} = 6.24^3\left[\left(\frac{1}{M^2 N}\right)\frac{\lambda_L{}^2 \cdot c_{PL} \cdot \rho_L{}^2 \cdot g}{\sigma \cdot L \cdot \rho_V}\right]\left(f_\xi f_p\right)^2\left(T_{al_in} - T_{wb}\right)^3$$

乱流域：

$$q_{wb} = \frac{0.66^5}{l}\left[\left(\frac{1}{M^2 N}\right)\frac{\lambda_L{}^{\frac{3}{2}} \cdot c_{PL} \cdot \rho_L{}^2 \cdot g}{\sigma \cdot L \cdot \rho_V}\right]^2\left(f_\xi f_p\right)^4\left(T_{al_in} - T_{wb}\right)^5 \quad \cdots（3）$$

ここに，　T_{al_in}：加熱裏面温度

T_{wb}：水飽和温度

実験から得る熱流束の比率から熱流束低減率を導入して，基準式を変形して沸騰冷却式における熱流束推定式（4）式を得る。

層流域：

$$q_{wb} = \alpha \cdot 6.24^3\left[\left(\frac{1}{M^2 N}\right)\frac{\lambda_L{}^2 \cdot c_{PL} \cdot \rho_L{}^2 \cdot g}{\sigma \cdot L \cdot \rho_V}\right]\left(f_\xi f_p\right)^2\left(T_{al_in} - T_{wb}\right)^3$$

乱流域：

$$q_{wb} = \alpha \cdot \frac{0.66^5}{l}\left[\left(\frac{1}{M^2 N}\right)\frac{\lambda_L{}^{\frac{3}{2}} \cdot c_{PL} \cdot \rho_L{}^2 \cdot g}{\sigma \cdot L \cdot \rho_V}\right]^2\left(f_\xi f_p\right)^4\left(T_{al_in} - T_{wb}\right)^5 \quad \cdots（4）$$

ここに，　α：低減率

2.3　熱流束の影響因子

提案する沸騰水冷式アルミパネル内では水の内部に水蒸気となった多量の気体が混在した不安定な状態で沸騰伝熱が行われ，熱交換効率が著しく低下する。

式（2）が示す熱流束は蒸発し水内部に混在する気泡の量によって決定される。気泡量は，＜加熱面積あたりの部材内部の単位水量＞，＜加熱温度＞，＜水内部の水蒸気圧力＞を影響因子とする。水気体と液体との比率を安定化するため，本研究では蒸気減圧弁を設置して水内部の気体を放出し冷却効果を保持する。

式（3）において気泡量は式（2）における値を用い，減圧がされていない状態での熱流束を基準値とし，これに対する減圧がされている状態での熱流束の比率を低減率と呼ぶ。実験において，＜単位水量＞は＜アルミパネル部材内部厚さｈ＞に，＜加熱温度＞は建築基準法が規定する加熱温度曲線が示す＜加熱度⊿Ｔ＞に，＜水内部の気圧＞は＜減圧弁作動圧力差⊿Ｐ＞として計測される。

3.　アルミ合金材における起泡度測定実験

3.1 実験目的と方法

実際に使用するアルミニウム建材の表面性状である起泡度 f_ξ を測定するため，本実験を行う。実験は図 3-1 のようにして行った。実験は各試験体の熱の移動が無いように全試験体を１度に加熱した。条件としては大気圧下において核沸騰が起きるようにした。本実験ではあらかじめ熱伝導率が既知である耐火ボードを同じ加熱炉で加熱し，事前に加熱炉の熱伝達率を測定することで水沸騰定常時の熱流束を求めた。実験条件は，f_ξ のばらつきを見るため，材質，成型方法をパラメータとし，A5052（圧延成型）を３体，A6063（押出成型）を２体とした。また，実験は水の供給はせずに行った。

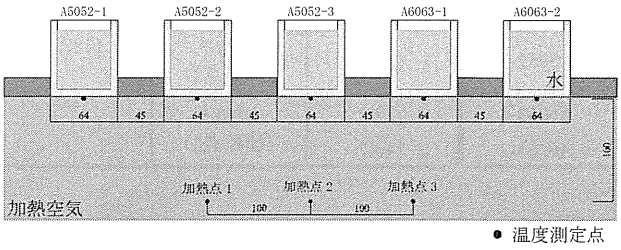

図 3-1　実験概要

写真 3-1　実験状況

3.2　実験結果

加熱温度の時間変化を**図 3-2** に，アルミ加熱表面温度の時間変化を**図 3-3** にそれぞれ示し，**表 3-1** に温度測定点の定常時平均温度を記す。

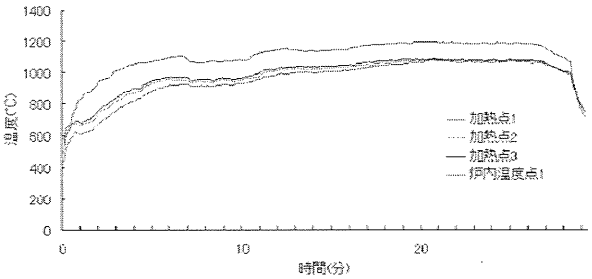

図 3-2 加熱温度時間変化

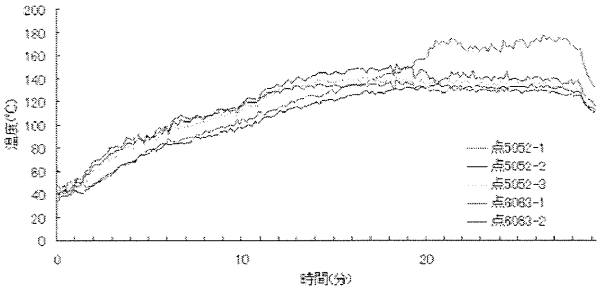

図 3-3 アルミ加熱表面温度時間変化

表 3-1　温度測定点の定常時平均温度

材質	加熱表面温度 [℃]	加熱空気温度 [℃]	炉内温度 [℃]
A5052	168.6	1069.2 (加熱点1)	1188.5
A5052-2	132.5		
A5052-3	135.5	1075.7 (加熱点2)	
A6063-1	129.2	1080.5 (加熱点3)	
A6063-2	140.7		

3.3　起泡度の算出

図 3-4 のモデルから１次元の熱の釣り合い式（５）～（８）をたて，式（３）より起泡度 f_ξ を算出する。

$$q_{in} = q_{out} = q_{wb} \qquad \cdots (5)$$

$$\therefore\ q_{wb} = h_f \cdot \left(T_f - T_{al_out}\right) + F \cdot \sigma \cdot \left(\varepsilon_f \cdot T_f^{\,4} - \varepsilon_{al} \cdot T_{al_out}^{\,4}\right) \qquad \cdots (6)$$

$$q_{wb} = \frac{\lambda_{al}}{t_{al}} \cdot (T_{al_out} - T_{al_in}) \qquad \cdots (7)$$

$$\therefore\ T_{al_in} = T_{al_out} - \frac{t_{al}}{\lambda_{al}} \cdot q_{wb} \qquad \cdots (8)$$

h_f：加熱空気の熱伝達率

F：形態係数

ε_f：加熱炉火炎の放射率

ε_{al}：アルミニウム合金の放射率

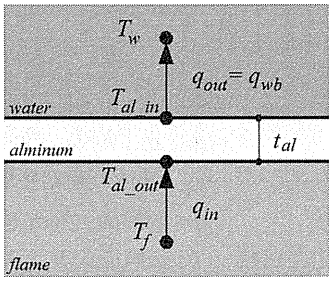

図 3-4　f_ξ 算出モデル

ここで，加熱炉の熱伝達率 h_f は熱伝導率が既知の耐火ボードを加熱炉で加熱し，定常状態における耐火ボードの表裏温度，加熱空気温度を測定することにより算出した。また形態係数は試験体によって変化が微小と考え，試験体 A5052-3 の場所における形態係数を空間分割法[文8)]によって求め，$F = 0.835$ となった。各試験体の f_ξ を**表 3-2** に示す。

表 3-2　各試験体における f_ξ

試験体No.	気泡度 f_ξ	f_ξ 平均 (f_ξ 基準値)
A5052-1	0.216	-
A5052-2	0.584	0.552
A5052-3	0.519	
A6063-1	0.677	0.555
A6063-2	0.432	

試験体 A5052-1 の f_ξ が他の試験体に比べ半分程度小さい値となった。そのため，A5052 における f_ξ の基準値としては，試験体 A5052-2，A5052-3 の平均値を用いる事とする。A5052，A6063 の f_ξ の平均値を比べると，ほぼ同じ値となっており，材料，成型方法の違いによって f_ξ に大きく違いが出ないであろう事が推察される。

4. 蒸気減圧弁付き床材の沸騰時熱流束測定実験

4.1 実験目的と方法

蒸気減圧弁の付いたアルミニウム合金（A5052）床材の部材内部の気泡量変化時の，水沸騰時熱流束の低減率の測定を行うため本実験を行った。実験は**図 4-1～4-3** のようにして行った。部材内部の気泡量を測定することが困難であったため，実験では**図 4-1** のように圧力が 0.002［MPa］で開く蒸気減圧弁を試験体に取付け，最初に部材にかかる圧力を，水の高さ H を変化させる事によって部材内部の気泡量を変化させた。実験では水核沸騰時の水位を一定に保ちながら核沸騰時の部材温度を測定し，その値を用いて核沸騰時の熱流束を算出し，f_{ξ} 基準値を用いた場合の熱流束との比を出し低減率 α を算出する。実験は f_{ξ} のばらつきを除去するために同じ試験体を全ての試験で使用する。実験条件を**表 4-1** に記す。

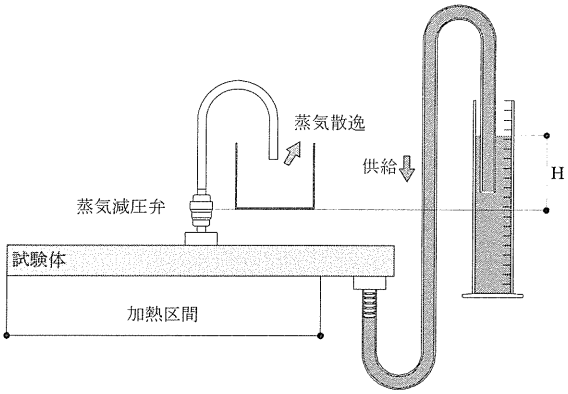

図 4-1　床材加熱実験概要

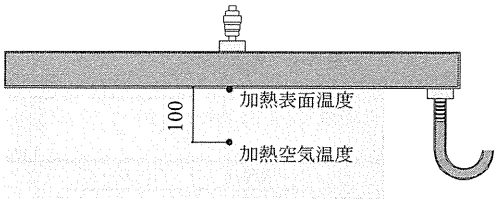

図 4-2　温度測定点

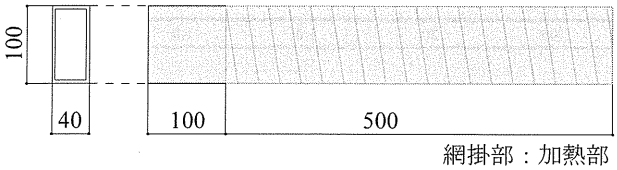

図 4-3　試験体概要

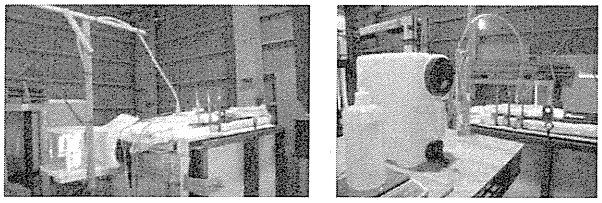

写真 4-1　全体概要（左：全体　右：水位調整方法）

写真 4-2　全体概要（左：減圧弁　右：熱電対設置状況）

表 4-1　実験条件

実験No.	H［mm］	材質	成形方法	試験体数	加熱温度［℃］
H-160	160	A5052	圧延	1	950℃一定
H-120	120				
H-80	80				
H-40	40				
H-0	0				

4.2 実験結果

各実験における測定点温度例を**図 4-4** に，定常状態時の各温度測定点平均値を**表 4-2** に示す。

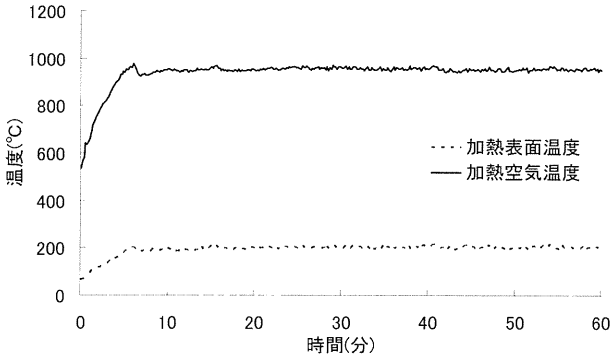

図 4-4　H-120 の部材温度変化

表 4-2　各温度測定点定常時平均温度

実験No.	加熱空気温度［℃］	加熱表面温度［℃］
H-160	964.6	187.5
H-120	961.6	195.0
H-80	968.0	203.6
H-40	957.2	199.8
H-0	958.6	206.2

4.3 熱流束低減に関する考察

各実験において水沸騰時熱流束 q_{wb_ex} を式（5）を用いて算出する。尚，H-160，H-120，H-80 では炉内温度

を測定していなかったため，H-40，H-0 の平均値を用いた。A5052 材の f_ξ 基準値を用いた場合の熱流束 q_{wb_b} との比較を**表 4-3** に示す。

本実験における熱流束の低下の原因として，内部の気泡量が多かったため，加熱裏面において気泡が触れながら流動する状態で，式（3）が適用できる面積の時間平均値が減ったことと，泡の影響によって気泡発生点が減ったことの 2 点が挙げられる。本実験において f_ξ が変化していたとは考えにくく，前者によって熱流束の低減が起きていたと考え，**表 4-4** における低減率を用い，式（4）を各開弁圧力下における熱流束と考える。

ここで，どちらが実際に熱流束 q_{wb} の低減に寄与していたかは明白ではない。もし，後者の現象により起きていたとすると式（3）からもわかるように，層流，乱流で値が大きく変化する。そのため，層流，乱流の違いが出る試験体を用いて同圧力下において実験し，どちらの現象が起きていたかを確認する必要がある。また，今回の実験では h=40（mm）のみに関して内部の気泡量を変化させて実験を行ったが，設計における幅を広げるために様々な h に対して低減率を測定する必要がある。

表 4-3　熱流束の低減率

実験No.	q_{wb_ex} [W/m²]	q_{wb_b} [W/m²]	低減率α	見かけの f_ξ
H-160	193,418	9,176,092	0.021	0.210
H-120	192,871	14,073,737	0.014	0.189
H-80	192,748	22,057,023	0.009	0.169
H-40	198,721	18,049,108	0.011	0.179
H-0	185,994	25,361,928	0.007	0.162

表 4-4　各開弁圧力差における低減率

H [mm]	⊿P [Pa]	低減率α
160	391.8	0.021
120	783.6	0.014
80	1175.4	0.009
40	1567.2	0.011
0	1959.0	0.007

4.4　蒸発水量に関する考察

本実験で測定した沸騰により蒸発した水量が算定できるかの確認を行う。蒸発水量を正確に測定できたのは実験 No. H=160mm のみであったため，実験 No. H=160mm に関して比較する。蒸発水量 W は，式（9）で算定した。

結果を**表 4-5** に示す。結果から，この手法により蒸発した水量を誤差 3.7%で算定できる事を確認した。

$$W = \frac{t \cdot (q_{wb} \cdot A)}{L} \qquad \cdots (9)$$

t：沸騰している時間

q_{wb}：沸騰時熱流束

A：加熱面積

L：蒸発潜熱

表 4-5　蒸発水量の比較

供給水量 [g]	突沸水量 [g]	蒸発水量 算定値 [g]	蒸発水量 実験値 [g]	誤差率 [%]
1803	774	1029	1069	3.7

4.5　床材の数値解析による耐火性能検証

4.3～4.4 節において得られた結果を用いて沸騰水冷式を適用した床材の耐火性能付与能力の検証を行う。解析モデルは**図 4-5** とし，解析条件は**表 4-6** とする。解析結果を**表 4-7** に示す。解析結果から床材は，沸騰水冷式が十分な耐火性能付与能力を持っていることが確認できた。

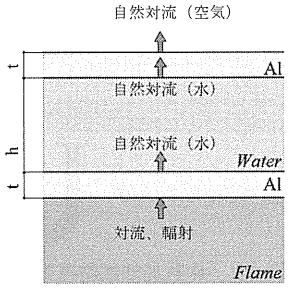

図 4-5 解析モデル

表 4-6　解析条件

解析方法	加熱空気温度 T_f [℃]	時間刻み⊿t [sec] 沸騰前	沸騰後	加熱空気の熱伝達率 h_f [W/m²K]
非定常解析	ISO834に準拠	1.0	0.5	50

アルミの熱伝導率 λ_{al} [W/m²K]	初期温度，放熱側空気 T_a [℃]	形態係数F	炎の放射率 ε_f	アルミの放射率 ε_{al}
209	20	1.0	1.0	1.0

表 4-7　解析結果[注3) 文9) 文10)]

板厚 t [mm]	2	6	10
部材最高温度 [℃]	189.1	190.6	192.2
ヤング率低減率	0.84	0.84	0.83
降伏応力度低減率	0.64	0.64	0.63
高温時許容応力度 [N/mm²] (A6063T-5)	70.8	70.1	69.4
沸騰までの時間 [min]	6.02	6.32	6.60
沸騰時必要水量 [kg/m²]	170	169	169

5. 壁材の実験内容と結果

5.1 実験目的と方法

蒸気減圧弁の付いたアルミニウム合金（A5052）壁材の部材内部の気泡量変化時の，水沸騰時熱流束の低減率の測定を行うため本実験を行った。

壁材は部材上部に行くにつれ気泡量が変化するため，加熱長さ y をパラメータとして，実大規模の実験を行う必要がある。しかし当研究室では実大規模の実験を行うことが難しいため，小型炉を使い，耐火性能を検証することとする。

実験は**図 5-1**，**図 5-2** のようにして行った。実験では**写真 5-1** のように圧力が 0.002［MPa］で開く弁を試験体に取付け，実際に使用されるうる部材断面から，**表 5-1** のように壁材内部厚さ h をパラメータとし，部材内部の気泡量の割合を変化させた。実験では水核沸騰時の水位を一定に保ちながら核沸騰時の部材温度を測定し，その値を用いて核沸騰時の熱流束を算出し，f_s 基準値を用いた場合の熱流束との比を出し低減率 α を算出する。

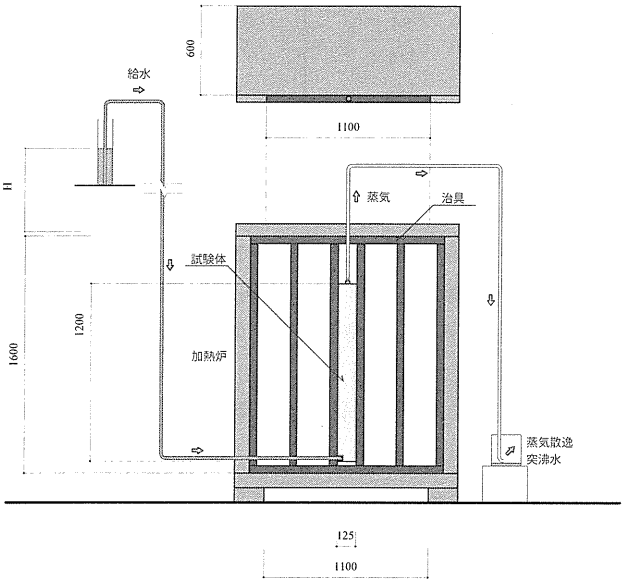

図 5-1　実験全体概要

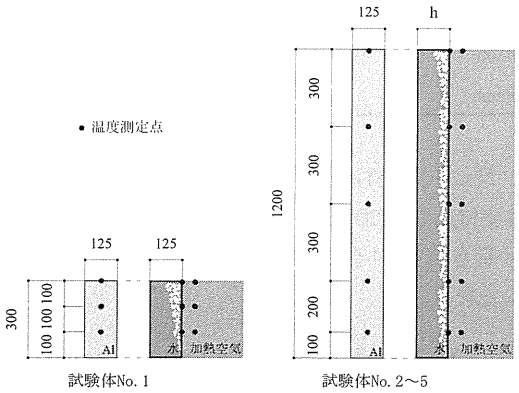

図 5-2　温度測定点位置

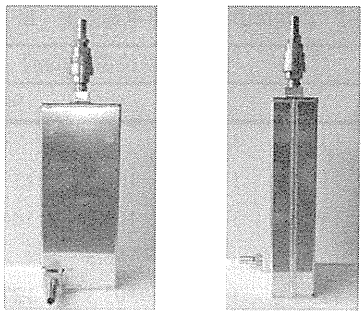

写真 5-1　試験体 No. 1（左：正面，右：側面）

表 5-1　試験体寸法　単位：mm

試験体 No.	加熱幅 b	加熱長さ y	壁材内部厚さ h
No.1	125	300	64
No.2		1200	34
No.3-1			64
No.3-2			64
No.4			94
No.5			114
No.6			144

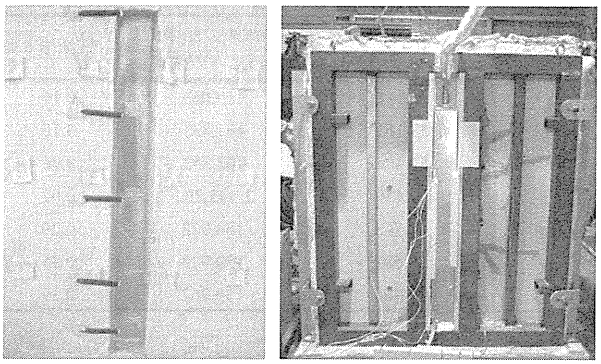

写真 5-2　左：熱電対設置状況，右：試験体設置状況

5.2 実験結果

各実験における各測定点温度の例を**図 5-3** に，定常状態時の各温度測定点平均値を**表 5-2** に示す。

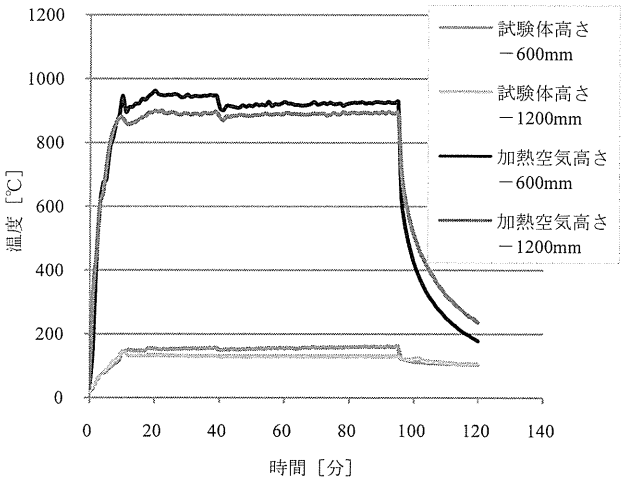

図 5-3　試験体 No. 2 の各測定点温度

表 5-2　試験体の各測定点平均温度　単位：℃

試験体	測定点位置［mm］				
	100	300	600	900	1200
No.1	138.9	152.8	-	-	-
No.2	113.4	148.1	156.1	133.7	130.4
No.3-1	148.5	147.8	106.9	144.9	174.9
No.3-2	-	-	156.3	-	157.0
No.4	125.6	111.4	103.3	127.9	136.7
No.5	121.6	135.6	120.9	124.3	164.3
No.6	118.3	127.5	125.1	126.4	142.9

5.3　熱流束低減に関する考察

1）壁厚さをパラメータとした低減率の推定

各実験において部材温度最高となった加熱面点において，水沸騰時の熱流束（実験値）q_{wb_ex} を，式（6）を用いて算出する。A5052 材の f_{ξ} 基準値を用いた場合の熱流束の基準値 q_{wb_b} との比較を表 5-3 に示す。

表 5-3　各試験体の熱流束低減率

試験体	熱流束（実験値）q_{wb_ex} ［W/m²］	熱流束の基準値 q_{wb_b} ［W/m²］	低減率 α
No.1	66,186	419,063	0.16
No.2	53,161	461,831	0.12
No.3-1	57,404	902,393	0.06
No.3-2	51,439	2,345,202	0.02
No.4	52,763	184,922	0.29
No.5	55,533	159,973	0.35
No.6	53,966	136,762	0.39

傾向として壁材の内部寸法（壁外寸と部材板厚の差）が小さいほど熱流束低減率 α が小さくなることが分かる（図 5-4 参照）。これは，壁厚が小さいほど，壁厚に対する内部の気泡量の割合が大きかったため，加熱裏面において気泡が触れながら流動する状態であり，式（3）が適用できる時間平均値が減ったためであると思われる。壁材内部の気泡量を，単位時間あたりの蒸気発生量として捉え，低減率の傾向と比較すると，内部寸法が小さいほど蒸気発生量は大きくなり，低減率が小さくなっている。これは前述の内部の気泡量の割合が大きいということに結びつく結果である。気泡量の割合は部材垂直断面の蒸気量を断面積で除したものであるので，蒸気発生量が大きくなり内部寸法が小さくなると，気泡量の割合が大きくなる。このことから，実験を行った範囲で熱流束低減率 α の実験式（10）を提案する。この実験式を用いることで，設計の際の壁厚に応じて熱流束を求めることが可能となる。

$$\alpha_h = 0.003 \cdot h - 0.05 \qquad \cdots (10)$$

ここに，　h：壁材部材内部厚さ［mm］

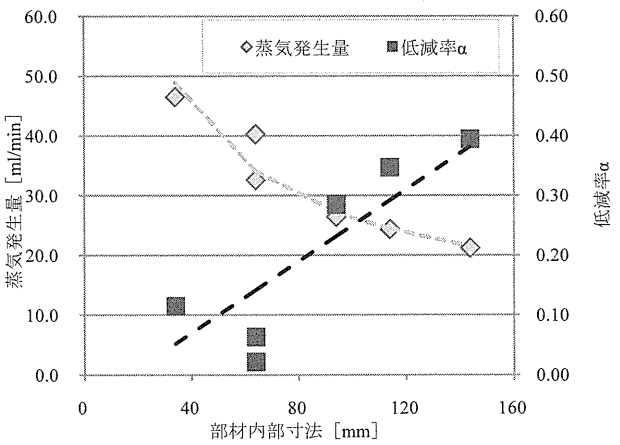

図 5-4　蒸気発生量と低減率 α

表 5-4　壁材内部寸法の蒸気発生量と低減率

試験体	内部寸法h［mm］	蒸気発生量［ml/min］	低減率α
No.2	34	46.5	0.12
No.3	64	40.3	0.06
No.3-2	64	32.6	0.02
No.4	94	26.4	0.29
No.5	114	24.4	0.35
No.6	144	21.2	0.39

2）実大規模壁材の火災時熱流束の推定

本項では，小型加熱炉で行った実験結果から実大規模の壁材の熱流束の推定を目的とする。

5.2 項より試験体 No.1（壁厚 70mm，壁材高さ 300mm）の熱流束を基準値として求める。試験体 No.2（壁厚 70mm，壁材高さ 1200mm）の熱流束を基準値で除することによって壁材高さに関する低減率 β を求める。

表 5-5　壁高さに関する低減率 β_H

温度測定位置	熱流束［W/m²K］			低減率β_H	低減率β_H（平均値）
	No.1	No.3-1	No.3-2		
300mm	67,418	52,160	54,517	0.79	0.84
600mm	-	59,612	55,090	0.85	
900mm	-	63,512	50,991	0.85	
1200mm	-	65,196	50,962	0.86	

試験体 No.1 の壁材高さ 300mm の熱流束を基準とし，試験体壁材高さ 1200mm の熱流束との低減率の関係から壁材高さに関する低減率 β を推定すると以下の式（11）となる。

$$\beta_H = -1.203 \times 10^{-4} \cdot H + 1.036 \qquad \cdots (11)$$

ここに，H：壁高さ［mm］

ここで，壁材高さ 300mm と壁材高さ 1200mm，2 つの関係から低減率を推定しているが，これは，加熱面積に泡の発生量がほぼ比例すると考えられ，試験体の No.1 と No.2 は加熱幅が一定であり，泡の発生量が高さ方向に比例すると考えたからである。しかし，正確に比例するとは言えず，ここで求める壁高さに関する低減率 β はあくまで参考値であり，実大規模の実験を行い検証する必要がある。

3) 壁材の熱流束推定式の提案

壁厚さに関する熱流束低減率 α_h の実験式（10）と壁高さに関する熱流束低減率 β_H の推定式（11）を用いて，実験式（12）を提案する。この実験式を用いることで，壁厚，壁高さに応じて水沸騰時の熱流束を求めることが可能となり，設計の自由度を拡げることができると考える。

層流域：

$$q_{wb} = \alpha_h \cdot \beta_H \cdot 6.24^3 \left[\left(\frac{1}{M^2 N} \right) \frac{\lambda_L{}^2 \cdot c_{PL} \cdot \rho_L{}^2 \cdot g}{\sigma \cdot L \cdot \rho_V} \right] (f_\xi f_p)^2 (T_{al_in} - T_{wb})^3$$

乱流域：

$$q_{wb} = \alpha_h \cdot \beta_H \cdot \frac{0.66^5}{l} \left[\left(\frac{1}{M^2 N} \right) \frac{\lambda_L{}^{\frac{3}{2}} \cdot c_{PL} \cdot \rho_L{}^2 \cdot g}{\sigma \cdot L \cdot \rho_V} \right]^2 (f_\xi f_p)^4 (T_{al_in} - T_{wb})^5$$

… (12)

5.4 蒸発水量に関する考察

床材と同様に本実験で測定した沸騰により蒸発した水量が算定できるかの確認を行う。結果を**表 5-6** に記す。

表 5-6 から誤差率が約 80%以上であった。この結果から，壁材の蒸発水量は壁内部寸法（壁厚），加熱長さ（壁高さ）の影響で不正確になる可能性が高い。これは，蒸発した水蒸気が上昇する間に水へ凝縮するといった現象が起きるためであると考えられる。このことから現段階で火災時における壁材の正確な必要水量を求めることは難しい。実際の蒸発水量は式（9）よりも小さくなるため，この式を基準として，火災時のおおよその蒸発量を算出することは可能であると思われる。

表 5-6　蒸発水量の解析値と誤差

試験体	No.1	No.2	No.3-1	No.3-2	No.4	No.5	No.6
蒸発水量 [ml]	4,751	15,263	16,481	14,769	14,097	13,729	12,481
沸騰時間 [min]	72	72	72	72	67	62	58
蒸発水量 (解析値) [ml/min]	66	212	229	205	210	221	215
蒸発水量 (実験値) [ml/min]	9	46.5	40.3	32.6	26.4	24.4	21.2
誤差率 [%]	**86**	**78**	**82**	**84**	**87**	**89**	**90**

5.5 壁材の数値解析による耐火性能検証

提案した熱流束推定式（12）を用いて沸騰水冷式を適用した床材の耐火性能付与能力の検証を行う。解析モデルは**図 5-5** とし，解析条件は**表 5-7** とする。解析結果を**表 5-8** に示す。

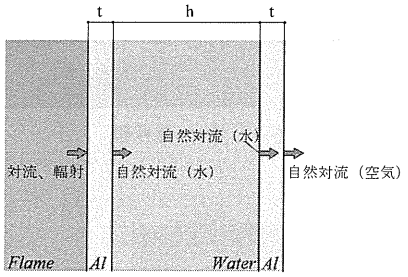

図 5-5 解析モデル

表 5-7　解析条件

解析方法	加熱空気温度 [℃]	加熱空気熱伝達率 [W/m²K]	接触熱伝達率 [W/m²K]
定常解析	945	50	373

形態係数 F	炎の放射率 ε_f	アルミの放射率 ε_{al}	壁厚 [mm]
1	1.0	1.0	70

表 5-8　解析結果[注3) 文10) 文11)]

壁材内部厚さ [mm]	34	64	94
部材最高温度 [℃]	154	152	142
ヤング率低減率	0.90	0.90	0.92
降伏応力度低減率	0.78	0.79	0.83
高温時許容応力度 [N/mm²] (A6063T-5)	86.3	87.2	91.7

6. 沸騰水冷式システムにおける接合部の提案

6.1 接合部の構造システム

沸騰水冷式耐火構造の床－壁接合部に求められる性能として以下が挙げられる

- 長期，短期の荷重を床材から壁材，壁材から壁材に流すことが出来ること。
- 止水性の観点から，ボルト接合等による穴が床，壁材に空けないこと。
- 耐火性の観点から，接合部が耐火性能を保持すること。
- 美観性の観点から，床，壁がフラットに取合うこと。

これら要求を満たす接合部を**写真 6-1**，**図 6-1** に示す。接合部の耐火性能は耐火性能を有する床，壁に覆われ，床壁が接合部の耐火被覆の役割を果たすことを前提に設計した。このため，本接合部には水を充填せずに耐火性能を保持することとなる。また，汎用性を高めるため押出成型を用いることを前提とし設計を行った。

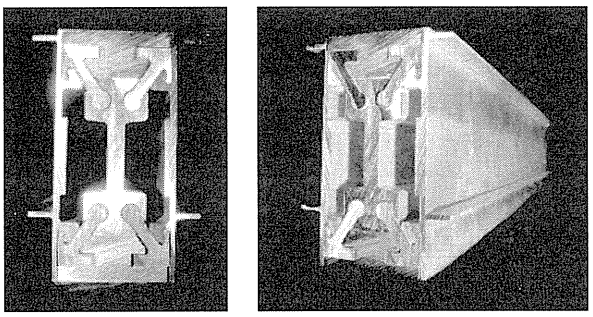

写真 6-1　接合部外観

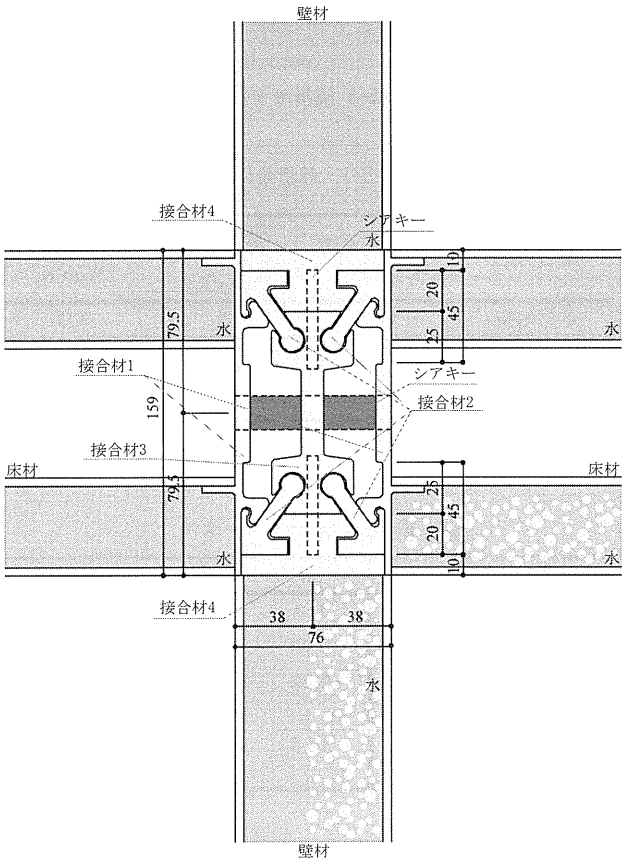

図 6-1　接合部断面図（壁－床 4 方向取り合い）

6.2　接合部における伝熱特性

本接合部形式は基本的に嵌め合い接合であり，熱は接合材と接合材の接触面から伝わってゆく。そのため，部材温度を解析によって把握しようとする場合に，その接触面における熱の伝わりやすさ（本論文ではこれを接触熱伝達率［単位：W/m^{2}K］と呼ぶ）が必要である。接触熱伝達率を決定する要因は，「真の接触部からの熱伝導」，「接触部内部の空気の対流による熱伝達と輻射」（**図 6-2** 参照）であり，前者に比べて後者の影響は無視できるほど小さいと言われている[文11)]。また，接触面に圧力が加わると真の接触部の面積が大きくなるため，接触熱伝達率の値は増加する。

上記を踏まえ，本節では接合部の加熱実験を行い，予め実験により求めた接触熱伝達率を用いて接合部の部材温度解析が可能であるかを検討する。

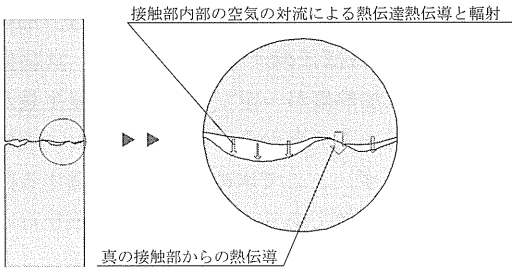

図 6-2　接触面における伝熱形式

6.3　接合部の加熱実験

1）実験目的と方法

予め求めた接触熱伝達率 h_c=373［W/m^{2}K］を用いて実接合部の部材温度推定が出来るかどうかの確認を行うために，本実験を計画する。実験は**図 6-3** のように行った。実験は部材に温度差をつけるために，接合部（A6063-T5）の上部からマントルヒーターで加熱し，接合部下部を氷水で冷やすことによって吸熱を行った。接合部の押出方向と直角な断面，接合部下部にはゴムを貼ることによって熱の逃げをなるべく少なくした。実験条件を**表 6-1** に示す。

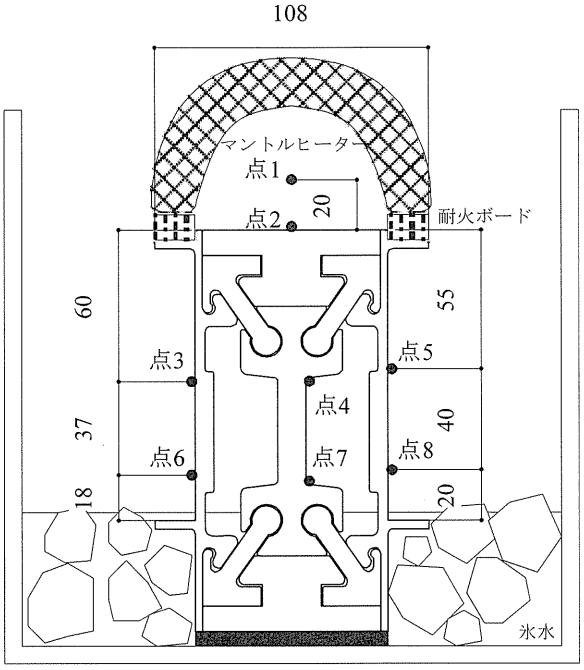

図 6-3　実験概要及び温度測定点

表 6-1　実験条件

実験No.	マントルヒーター設定温度［℃］
1-1	300
1-2	350
1-3	400

2）実験結果

実験データの定常状態における各点平均温度を表 6-2 に示す。

表 6-2　各店平均温度　単位：℃

実験No.	1-1	1-2	1-3
点1	249.9	290.0	333.2
点2	35.3	42.8	58.7
点3	10.2	9.6	10.6
点4	12.1	10.7	12.8
点5	10.8	9.0	11.2
点6	9.7	9.4	10.0
点7	9.5	7.3	7.9
点8	10.2	9.6	12.1

3）考察

上で得られた結果を用いて解析を行い，接合部部材温度が推定できるかどうかの確認を行う。具体的には点 1，点 6，点 7，点 8 の温度を境界条件として数値解析を行い，点 2，点 3，点 4，点 5 の温度が実験値とどのくらいの誤差があるのかを確認する。

実験を模擬するための解析条件を表 6-3，接触状態は実験前に撮影した図 6-3 左から判断した。また，解析結果の例（実験 No.1-1）を図 6-4 に示す。

表 6-3　解析条件

加熱空気温度［℃］	加熱空気熱伝達率［W/m²K］	接触熱伝達率［W/m²K］
点1における	15	373

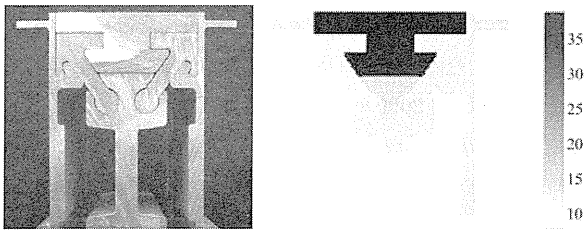

図 6-3　実験 No. 1-1（左：接触状況、右：解析結果）

点２～点５の実験値と解析値の比較を表 6-4 に示す。

表 6-4 から確認できるように，5.3 節で得られた接触熱伝達率 h_c = 373［W/m²K］を用いて，接合材の部材温度を最大で約 17%の誤差で推定できる事が確認できた。

表 6-4　実験値と解析値の比較

実験No.	場所	実験値［℃］	解析値［℃］	誤差率［%］
1-1	点2	35.3	39.7	12.4
	点3	10.2	10.1	1.0
	点4	12.1	12.8	6.2
	点5	10.8	10.6	1.6
1-2	点2	42.8	42.9	0.4
	点3	9.6	9.8	2.3
	点4	10.7	11.3	5.5
	点5	9.0	10.1	11.4
1-3	点2	58.7	48.9	**16.7**
	点3	10.6	10.5	0.9
	点4	12.8	12.5	2.3
	点5	11.2	12.5	11.9

6.5　接合部の数値解析による耐火性能検証

本節では接合部の数値解析により，接合部の耐火性能を検討する。部材の設計によって変更が考えられるもので，接合部の部材温度に強く影響すると考えられるものとして板厚 t があり，本解析では板厚をパラメータとして解析を行う。

1）解析条件

解析は接合部を２軸に対称とみなして図 6-1 の４分の１のモデルを解析した。接触熱伝達率は接触部にかかる接触応力により変化する。接触熱伝達率は接触応力がほぼ０の状態であるため，解析では接触部の熱伝達率 h_c = 373［W/m²K］を用いた場合と，連続体として解いた場合の２種類行い考察する。水には屋上部に貯水される水の圧力がかかると考え，1000［Pa］の付加圧力を与えている。表 6-5 に解析条件を示す。

表 6-5　解析条件

解析方法	加熱空気温度［℃］	加熱空気熱伝達率［W/m²K］	接触熱伝達率［W/m²K］
定常解析	945	50	373

形態係数 F	炎の放射率 ε_f	アルミの放射率 ε_{al}	壁厚［mm］
1	1.0	1.0	70

2）解析結果

解析結果例を以下表 6-6，図 6-4 に示す。

表 6-6　解析結果

板厚t［mm］	非連続体モデル		連続体モデル	
	平均温度［℃］	最高温度［℃］	平均温度［℃］	最高温度［℃］
4	136.5	190.9	132.8	190.7
7	142.7	192.8	137.4	191.8
10	147.9	194.6	141.7	192.4

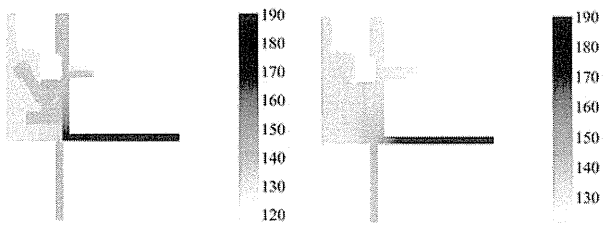

図 6-4　解析図 t=4 モデル（左：非連続体 右：連続体）

表 6-5，図 6-4 を見ると，非連続体，連続体モデルでは多少温度分布が異なるものの，降伏応力度，ヤング率に換算した場合はほぼ違いが無いと見て良い結果となった。部材温度分布の傾向として，部材最高温度は床下面で生じている。また床材，壁材最高温度よりも接合部温度が低くなるという結果となった。これらの結果から，床，壁材が耐火性を有していれば接合部も耐火性を有しているといえ，簡易に設計する場合は，床材，壁材の降伏応力度，ヤング率の低減率をそのまま接合部に用いる事で接合材の設計が可能となる。

6.　結論

本研究は，アルミニウム合金壁式構造へ沸騰水冷式を適用することにより，耐火性能付与能力があることを確認した。本論文によって得られた知見を以下に記す。

沸騰水冷式耐火構造は充填水が沸騰し，水蒸気の増加に伴い，水内部の圧力が増加するが，蒸気減圧弁を設置して水内部の気圧を減少させる実験を床材と壁材に関して行った。床材では，開弁圧力差に関して熱流束の基準式を用い低減率を求めた。床材の吸熱熱流束推定式から解析により床材が耐火性能を有していることを示した。

壁材では，壁内部厚さ，壁高さに関して，低減率の実験式を提案し，壁材の吸熱熱流束推定式から解析により，壁が耐火性能を有していることを示した。また，沸騰水冷式に適した接合部の開発，設計を行い，実験で接合部の熱伝達特性を把握し，その耐火性能を，床材，壁材，接合部を含め解析することで，床材，壁材が耐火性能を保持していれば，接合部が耐火性能を保持できるという結果を得た。これら実験と解析によって，アルミニウム合金の加熱側表面温度は 200℃以下に保持されることが示され，目標とする耐火性能を付与する可能性を立証した。これによって，アルミニウム合金構造による建築規模を大きくし用途を広げることができると考えている。

＜謝辞＞

本研究にあたり，接合部の作製にご協力頂いた三協立山アルミの山下良三氏，三協マテリアルの黒田直樹氏，加熱実験でご協力頂いたトーアマテリアル境工場の近藤政之氏をはじめ，多大なご協力とご支援を頂いた関係各所の皆様に，感謝の意を表します。

＜注＞

1)　アメリカ，ピッツバーグ州にある地上 64 階，高さ 256 m，平面は正三角形の隅を削りとった一辺 67.4mの鉄骨構造建築。

2)　沸騰時必要水量の単位は加熱面積あたりの水量

3)　高温時のヤング率，降伏応力度の低減率は文献 10，11 から求めた。

＜参考文献＞

1)　飯塚幸治，藤中英生，齋藤光：水冷式鋼管構造の耐火性に関する研究 その１．水冷式鋼管柱の耐火試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，1970.9

2)　飯塚幸治，藤中英生，古平章夫：水冷式鋼管構造の耐火性に関する研究 その３．自然循環式および給水式の耐火試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，1976.10

3)　古平章夫，飯塚幸治：水冷式鋼管構造の耐火性に関する研究 その４．鋼管内外表面温度差による熱応力について，日本建築学会大会学術講演梗概集，1979.9

4)　古平章夫，飯塚幸治：水冷式鋼管構造の耐火性に関する研究 その５．模型フレーム加熱実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，1981.9

5)　西村俊彦：水冷式鋼管構造の耐火性に関する研究 －実大試験体を用いた耐火実験による性能確認－，日本建築学会大会学術講演梗概集，2009.8

6)　新谷眞人，平間英明，永井拓生，今井大樹：水冷を用いたアルミニウム合金構造材の耐火性能付与に関する研究　その１　軸材への適用，日本建築学会大会学術講演梗概集，2009.8

7)　今井大樹，新谷眞人，永井拓生，平間英明：水冷を用いたアルミニウム合金構造材の耐火性能付与に関する研究　その 2 面材への適用，日本建築学会大会学術講演梗概集，2009.8

8)　西川兼康，藤田恭伸：伝熱学，理工学社，1982.2

9)　堀川達弥，小野徹郎，石田和人，上杉秀樹，橋本篤英：アルミニウム合金を用いた建築構造に関する研究（その 21）建築構造部材としてのアルミニウム合金圧縮部材の高温強度特性，アルミニウム建築協議会発表論文別冊集，2004.3

10)　堀川達弥，小野徹郎，石田和人，橋本篤英：アルミニウム合金を用いた建築構造に関する研究（その 35）アルミニウム合金部材の高温耐火特性 その 2，アルミニウム建築協議会発表論文別冊集，2004.3

11)　J.P.ホールマン：伝熱工学 上，ブレイン図書出版株式会社，1982.3

＜研究協力者＞

今井　大樹　　早稲田大学大学院創造理工学研究科修士課程（当時）

御所園　武　　早稲田大学創造理工学部　学士課程